

УДК 73, 75

А.И. Бажал, д-р техн. наук, Харьков, Украина, В.М. Кучеровский, канд. техн. наук, А.М. Барак, Москва, Россия, А.А. Бажал, Кривой Рог, Украина, Ант.А. Бажал, Харьков, Украина, С.Г. Серебrenникова, Москва, Россия.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ТВЕРДЫХ СТРУКТУР

*В статті приведені основні закономірності розповсюдження хвиль в пористих колекторах і їх вплив на масоперенос рідинних середовищ в капілярних структурах. Приведені кількісні оцінки хвильової інтенсифікації капілярного масопереносу. Викладені результати промислового використання хвиль при свердловинному видобутку корисних копалин. Описана фізика процесів, приведені ілюстрації.*

*В статье приведены основные закономерности распространения волн в пористых коллекторах и их влияние на массоперенос текучих сред в капиллярных структурах. Приведены количественные оценки волновой интенсификации капиллярного массопереноса. Изложены результаты промышленного применения волн при скважинной добыче полезных ископаемых. Описана физика процессов, приведены иллюстрации.*

*The article outlines the main factors of wave transition in porous rocks and the way they influence transition of liquid masses contained in capillary structures of such rocks. Quantitative estimation of wave based intensification of capillary mass transition is made. Outlined result of industrial use of wave in well based extraction of natural reserves. Outlined physical principals of the processes illustrated with examples.*

С помощью волн простыми техническими средствами обеспечивается получение очень высоких значений локально сосредоточенного бегущего перепада (градиента) давлений. Несложным оборудованием можно получить давление от 1 000 до 10 000 атм. [1]

$$P_{\text{волн}} = \rho a v,$$

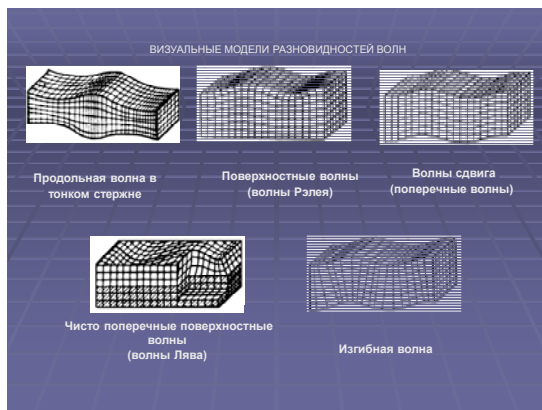
где:  $P_{\text{волн}}$  – бегущий перепад (градиент) волнового давления;

$a$  – скорость волны;

$\rho$  – плотность среды – волновода (например, водоносного коллектора);

$v$  – скорость возмущения среды (любой быстропотекающий процесс).

С помощью бегущего градиента волнового давления обеспечивается дилатантное трещинообразование в расчетной призабойной зоне коллектора для повышения его абсолютной проницаемости. В основе этого явления лежит образование суперпозиции напряжений, обеспечивающих предельную неравномерность нагружения коллектора, которая обеспечивает дилатантное разуплотнение массива.



По Биоту:

$$\sigma\phi = \sigma_0 - Pp;$$

$$Pp = \lambda \sigma v;$$

$$\lambda = 0,82 - 0,9,$$

где:  $\sigma\phi$  – фактическое напряжение в массиве в зоне суперпозиции волн и статических нагрузок на месте разуплотнения в прискважинном пространстве;

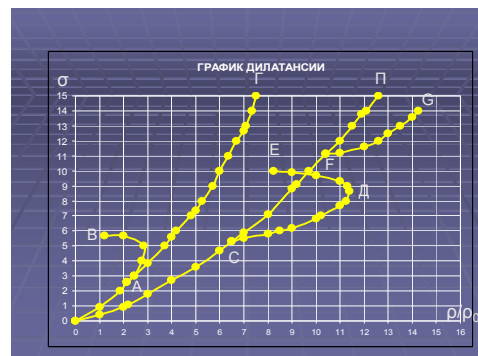
$\sigma_0$  – напряжение в массиве без учета его пористости;

$P_p$  – поровое давление в коллекторе;

$\sigma_v$  – вертикальное (геостатическое) напряжение в коллекторе;

 $\lambda$  — коэффициент степени влияния жидкости на прочность горной породы.

Изменяя поровое давление в коллекторе, мы создаем совместно с волнами условия для дилатантного порообразования в коллекторе. В процессе дилатансии меняется структура породы (уменьшается ее плотность). Такие процессы всегда предшествуют землетрясениям и по изменению структуры породы прогнозируют землетрясения.



$\sigma$  – напряжение сжатия горной породы

$\rho$  – текущее значение плотности сжимаемой породы

$\rho_0$ — начальное значение плотности сжимаемой породы

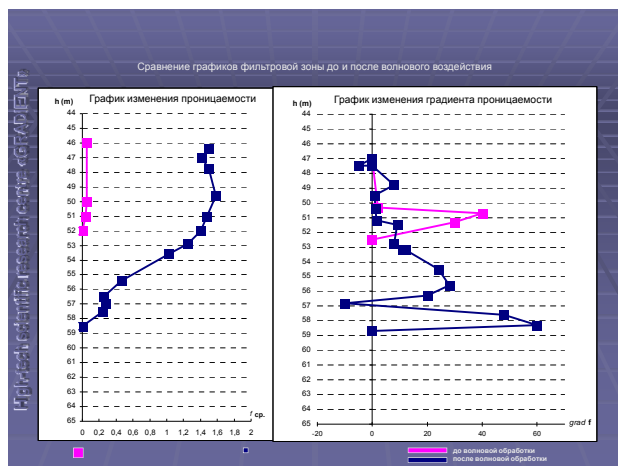
ОГ – для монолитной горной породы

ОП – для пористой горной породы

А, В, С, Д, Е, Г, П, Г – точки изменения характера деформаций при неравномерном нагружении

При волновом нагружении коллектора под градиентом волнового давления будет находиться только та часть массива, которая охвачена волной. Это значит, что волновыми силами можно производить локальное повышение проницаемости, которое не будет выходить за пределы самого маломощного пласта [2].

Статистический реперд (градиент) давления затухает в коллекторе на длине до 10 м по радиусу от скважины. Дальше этого расстояния нет никаких рычагов воздействия на коллектор, кроме волнового бегущего перепада давления (градиента). Бегущий волновой реперд давления (градиент) распространяется по насыщенному коллектору независимо от его проницаемости на любые расчетные расстояния. При этом он осуществляет направленный дискретный массоперенос текучих сред в коллектор, включая кольтанат.



Волны активируют жидкие и твердые структуры и позволяют управлять сорбционными и химическими процессами в коллекторе. От этих процессов зависит раскопывания коллектора и, как следствие, количество добытой замещенной воды из коллектора. Соответственно коэффициент извлечения воды тоже увеличивается. Традиционно значение коэффициента извлечения нефти составляет 0,1 – 0,15 (до 0,3), воды – до 0,5 на больших глубинах, и до 0,7 – на малых глубинах.

Волны снижают поверхностное межфазное натяжение и уменьшают величину капиллярных сил.

Волны позволяют управлять процессом насыщения пористого коллектора (пропитки) и, таким путем, обеспечивать подвижность защемленных (похороненных) в пористых структурах жидкостей. Величину капиллярного давления определяют по формуле:

$$P = 2 \xi / r, \quad \partial e;$$

$P$  – капиллярное давление;

 $\xi$  — поверхностное натяжение жидкости;

$r$  – радиус капилляра, например, для воды при  $r = 0,01 \text{ мкм} = 10^{-8} \text{ м}$ ,

$$\xi = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{сек} / \text{м}^2 \quad P = 160 \text{ атм}, \text{ а при } r = 0,001 \text{ мкм}, P = 1600 \text{ атм}.$$

Такие градиенты давления технически невозможно создать в скважине, а, значит, и невозможно с помощью статического давления обеспечить капиллярное движение воды в коллекторе. Это будет похороненная (потерянная) вода.

Поры размером 0,01 – 0,001 мкм составляют до (50 – 70)% общего порового объема. Статический перепад давления уменьшается радиально вглубь массива по экспоненте до нуля на глубине до 10 метров.

Таким образом, только бегущий волновой перепад давления позволяет обеспечить критическое насыщение, а значит и подвижность жидкости в капиллярной части коллектора, и, соответственно, повышать извлечение воды из коллектора, а в отработанных коллекторах доизвлекать ещё 30-50% зашумленной (похороненной) воды в неподвижном состоянии.

Статистический перепад давления на скважине (депрессия) способен обеспечить переход перепада давления, направленный от скважины вглубь массива. Защемленная жидкость, при этом, будет двигаться от скважины в периферийные области массива. Волновой перепад давления может иметь и противоположное направление и обеспечивать сброс защемленной воды из капиллярной прискважинной зоны коллектора в скважину. Это исключительно эффективно для повышения дебитных характеристик скважин. Дальность действия бегущего волнового градиента давления достигает десятков метров, а в специально сконструированных устройствах она может достигать сотни метров и километров. Интенсивность затухания волны определяется по формуле:

$$PL=POe^{-\alpha L}; \text{ где:}$$

$PL$  – давление в волне на расчетном расстоянии от скважины;

$PO$  – давление в волне в скважине;

$\alpha$  – декремент затухания волны;  $L$  – расстояние, на котором измеряется волновое давление.

Волновое давление понижает поверхностное натяжение жидкости и обеспечивает ее десорбцию в порах. Это способствует появлению свободного объема жидкости в порах и снижает величину потребного статического градиента давления, необходимого для передвижения воды в капиллярных коллекторах.

Статический перепад давления действует во все стороны одинаково. Волновое давление действует строго направленно в соответствии с вектором скорости первичного волнового возмущения. Это позволяет решать задачи направленного массопереноса жидкости в коллекторе, и создавать условия для неравномерного нагружения окосколлажиного пространства коллектора для обеспечения дополнительного порообразования коллектора в режиме дилатансии.

Таблица – Типовые примеры результатов волновых обработок водяных скважин на Юге России (Волгоградская обл, Ставропольский край, Калмыкия)

№ п/п	Дата обработки скв.	№ скважины, район	Интервал обработки, М	Тип коллектора	Наличие фильтра	Дебит, м3/сут		
						первоначальный	до	после
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	09.94	13А-Выезд	22-30	песчан.	Фильтр	-	10	60
6	10.94	11-Выезд	23-28	песчан.	Фильтр	-	7	16
7	10.94	12-Выезд	23,5-29,5	песчан.	Фильтр	-	3	14
9	11.94	15-Выезд	36,5-38,5	песчан.	Фильтр	-	10	24
4	12.94	7-Выезд	60-73	песчан.	Фильтр	-	5	24
1	02.95	7-Грачи	42,5-43,5	песчан.	Фильтр	12	0	16
14	03.95	5-Урюпинск	54-80	известн.	б/ф	120	0	120
5	04.95	9Б-Выезд	18,1-30	песчан.	Фильтр	-	10	30
3	06.95	18-Грачи	38-44	песчан.	Фильтр	10	7,2	20
20	06.95	1-Алексеевск	20-29	песчан.	Фильтр	нет	7,3	15
21	07.95	2-Алексеевск	22-31	песчан.	Фильтр	-	6	15
22	07.95	3-Алексеевск	24-31	песчан.	Фильтр	-	7	10
23	07.95	4-Алексеевск	30-38	песчан.	Фильтр	-	6	14
24	07.95	5-Алексеевск	20-29	песчан.	Фильтр	-	0	14
2	08.95	13-Грачи	35-51	песчан.	Фильтр	45	45	72
11	11.95	2-Урюпинск	40-76	известн.	б/ф	18	18	70
12	12.95	3-Урюпинск	36-50	известн.	б/ф	18	15	90
13	12.95	4-Урюпинск	45-58	известн.	б/ф	60	15	115
15	01.96	7-Урюпинск	42-50	песчан.	б/ф	100	50	100
19	02.96	20-Елань	166-182	песчан.	Фильтр	16	0	36
18	03.96	19-Елань	172-188	песчан.	Фильтр	16	16	27
26	04.96	8-Ольховская	33-39	песчан.	Фильтр	5	5	23
27	04.96	9-Ольховская	34-39	песчан.	Фильтр	нет	0	25
29	04.96	1-Качалино	35-41	песчан.	Фильтр	4	4	16
10	05.96	4А-Выезд	19-26,4	песчан.	Фильтр	-	10	18
16	05.96	14-Елань	188-200	песчан.	б/ф	10	0	10

Продолжение таблицы

17	05.96	15-Елань	185-189	песчан.	Фильтр	8	8	36
30	05.96	3/94-Ср.Пруды	115-125	песчан.	Фильтр	2,5	2,5	7
28	06.96	10-Лог	110-120	песчан.	Фильтр	-	0	12
31	06.96	1-Солодча	64-71	песчан.	Фильтр	нет	0	18
25	07.96	2-Ольховская	33-39	песчан.	Фильтр	6	0	18
32	06.97	1-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	7	2,7	6,4
34	07.97	3-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	9	2,7	9
33	08.97	2-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	10	3	12
35	08.97	4-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	9	2,3	8,7
36	08.97	5-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	12	6	10
37	08.97	6-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	12	2	9,58
38	08.97	7-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	10	3,5	8
40	09.97	3-Николаевск	38-49	песчан.	Фильтр	75	40	120
39	10.97	1-Николаевск	39-53	песчан.	Фильтр	75	40	120
41	10.97	4-Николаевск	38-49	песчан.	Фильтр	50	25	78
42	10.97	12-Николаевск	38-49	песчан.	Фильтр	40	30	60
43	04.98	Ново-Николаев	110-122	песчан.	Фильтр	10	0	25
44	05.98	1-Фролово	25,4-35,9	песчан.	Фильтр	18	14	24
45	05.98	9Б-Фролово	17-29	песчан.	Фильтр	18	0	29
46	08.98	1-Суруикино	20-30	песчан.	Фильтр	20	5	30
47	11.98	Н.Чир	190-210	песчан.	б/ф	5	0	10
48	02.99	Н.Чир	190-210	песчан.	б/ф	5	0	10
49	06.99	Ольховка	43-50	песчан.	Фильтр	8	3	15
50	06.99	Ольховка	43-50	песчан.	Фильтр	8	3	15
54	07.99	Дубовка	400-405	песчан.	б/ф	25	0	25
52	08.99	Калмыкия-Элиста	50-60	песчан.	Фильтр	30	16	40
53	08.99	Клетский	40-52	песчан.	Фильтр	8	5	15
51	09.99	Рудня	135-145	песчан.	б/ф	8	5	10

ПРИМЕЧАНИЕ: Всего обработано более 1000 скважин различного назначения

Волновое поле действует с различными силами на частицы многокомпонентной (многофазной) среды, обладающими различным волновым сопротивлением. Поэтому будет иметь место бесконтактное разделение жидкостей и включений, в том числе осаждение взвесей в жидкостях.

Волны генерируются на устье скважины (на поверхности), передаются вдоль скважины по магистральному (жидкостному) волноводу до коллектора,

где их отражают и направляют вдоль коллектора. Волны должны иметь расчетные параметры (форму, соответствующую закону сопротивления коллектора нагнетанию жидкой фазы, амплитуду, длину, частоту). Волновод – жидкость в скважине, должен обеспечивать передачу волны в коллектор с минимальными потерями. Передача, поворот и излучение волн в другие среды должны обеспечиваться в соответствии с законами механики волн.

В скважину на устье излучают волны с осевым вектором скорости волнового движения, а на уровне коллектора его поворачивают вдоль продуктивного горизонта.

Например, волна с расчетными параметрами передается на забой скважины глубиной до 3 тысяч метров с потерями по амплитуде волны до 25%.

#### Выводы:

Волновое воздействие на коллектор обеспечивает условия для повышения водопритока к скважине и, в конечном счете, повышает производительность скважин. Опыт показывает, производительность можно повысить в несколько раз до нескольких десятков раз.

Более сложные технологии, включающие специальные волновые воздействия, позволяют повышать извлечение воды из коллектора, а в отработанных коллекторах доизвлекать еще (30-50)% заземленной в мелкопористой части коллектора воды.

Инновационные и модернизированные методы извлечения жидких и газообразных полезных ископаемых с применением силовых волн позволяют сократить затраты на добычу последних в 2-3 раза и довести их извлекаемость до соответствия с начальными запасами.

**Список использованных источников:** 1.Бажал А.И. и др. Новые проблемы и новые технологии добычи углеводородов на больших глубинах. Высокие технологии в машиностроении, Национальный Технический Университет (ХПИ), 2/2006. 2. Бажал А.И. и др. Природные коллекторы и общие закономерности движения нефти и газа в них. Высокие технологии в машиностроении, Национальный Технический Университет (ХПИ), 2/2009. 3. Бажал А.И. и др. Обеспечение жидкостной проницаемости горных пород на месте их залегания с помощью силовых волн. Высокие технологии в машиностроении, Национальный Технический Университет (ХПИ), 2/2007.

Поступила в редколлегию 22.01.2012